

## 저장탱크 바닥면 검사를 위한 누설자속 탐상 시스템 개발

### Development of MFL Testing System for the Inspection of Storage Tank Floor

원순호\*<sup>†</sup>, 조경식\*, 이종오\*, 장홍근\*\*, 주광태\*\*

Soon-Ho Won\*<sup>†</sup>, Kyung-Shik Cho\*, Jong-O Lee\*, Hong-Keun Chang\*\* and Gwang-Tae Joo\*\*

**초 록** 누설자속법은 신뢰성과 경제성을 충족시키면서 정성적인 결과를 제공하는 비파괴시험법이다. 특히 저장탱크 바닥판의 검사에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여주었다. 이전에 저장탱크 바닥판의 검사에 사용되었던 초음파탐상법은 검사속도가 느리고, 적용에 따른 어려움으로 국부검사에 한정되어 왔다. 본 연구팀은 이러한 초음파탐상의 단점을 극복하고자 누설자속탐상법을 개발하였다. 개발된 시스템의 주요부분은 누설자속 발생부, 어레이센서, crawler 및 운용 프로그램으로 구성되어 있고, 최종적으로 개발된 시스템이 6mm강판에서  $\phi 3.2\text{mm}$ , d 1.2mm와 같은 인공결함을 검출할 수 있음을 보여주었다.

**주요용어:** 누설자속, 저장탱크, 홀효과, 영구자석, 어레이센서

**Abstract** MFL method is a qualitative inspection tool and is a reliable, fast and economical NDT method. The application of MFL method to the inspection of storage tank floor plates has been shown to be a viable means. Examination of tank floors previously depended primarily upon ultrasonic test methods that required slow and painstaking application. Therefore most ultrasonic inspection of storage tank has been limited to spot testing only. Our NDE group have developed magnetic flux leakage system to overcome limitation of ultrasonic test. The developed system consists of magnetic yoke, array sensor, crawler and software. It is proved that the system is able to detect artificial flaw like 3.2mm diameter, 1.2mm depth in 6mm thick steel plate.

**Keywords:** magnetic flux leakage, storage tank, hall effect, permanent magnet, array sensor

## 1. 서 론

국내 에너지 수요는 경제규모의 성장 확대와 더불어 급속히 증가되어 왔으며 수요 증가분의 대부분이 석유에 의존되고 있는 것은 주지의 사실이다. 또한 석유화학 공업이 발전되어옴에 따라 공업 원료면에서의 석유는 주역의 자리를 차지하고 있지만 석유자원이 없는 국내실정으로서는 전 사용량을 수입에 의존하므로 당연히 대단위

탱크 저장시설을 필요로 하게 된다. 따라서 탱크의 종합적인 안전성 확보는 매우 중요한 일이고, 발생 가능한 손상을 검출하기 위한 정기점검, 개방검사 등이 법적으로 요구되고 있다[1,2].

저장탱크의 손상은 거시적으로는 붕괴, 용접부의 파손, 균열, 변형, 경사를 유발할 수 있고, 저장물 누출로 인한 화재, 폭발 또는 환경오염과 같은 2차적인 사고의 원인이 될 수 있다. 특히 탱크 주요 부재인 바닥판의 경우 부식발생의

가능성이 상존하고 있지만 접근이 제한되기 때문에 손상발생 확인을 위한 적절한 대책이 마련되어야 한다. 그러나 현재 국내 기술력의 부족으로 이 부분에 대한 종합적인 평가가 외국에 의존하고 있고, 이미 개발된 장비를 도입하는 방법으로 검사를 수행하고 있다. 이러한 배경에서 저장탱크의 바닥면 검사를 비파괴적으로 수행하기 위한 시스템 개발을 목표로 본 연구가 수행되었고, 방법론으로 누설자속법(magnetic flux leakage technique: MFL technique)을 사용하였다. 외국에서 발표된 장비는 두께대비 50% 이상의 결함에서 발생하는 누설자속을 기준으로 이보다 큰 신호를 검출하는 문턱값법을 적용하고 있다[3].

본 연구에서는 누설자속발생부, 어레이센서와 탐상 crawler에 대한 설계 및 제작이 성공적으로 수행되었고, 운용 프로그램의 개발을 통해서 산업용 컴퓨터를 기반으로 하는 '누설자속탐상 시스템'을 개발하였다. 개발된 장비는 기존의 외국장비와 대비 성능시험을 수행하여 성능을 검증하고자 하였다.

**2. 시험편 및 실험방법**

자기장은 자화된 물질의 내부나 주변에서 자력이 미치는 공간으로 정의된다. 보통 자력선으로 정의된 가상의 선이 분포하는 공간을 말하며, 단위면적을 지나가는 자력선의 수를 자속밀도로 정의하는데, 자기장의 강도와 재질의 투자를 증가에 따라 자속밀도는 증가하게 된다. 누설자속법은 강자성체의 표면 또는 표면적하의 결함을 검출하는데 효과적으로 적용할 수 있다[4-6]. 재질이 자기적으로 동방일 때, 강자성체에 형성된 자속의 방향은 동일하다. 그러나 재질 표면 또는 내부에 공동이나 개재물이 존재할 때는 자속이 외부로 누설되어 자기장이 섭동하게 되는데 이를 누설자장이라 부른다[7]. 홀센서를 이용하여 이러한 누설자장의 측정이 가능하며, 산업적으로 이것을 이용하여 강자성체의 비파괴검사에 적용한 것이 누설자속법이다[8-11].

시험편은 저장용탱크의 바닥판재로 상용되는 압력용기 용강 SGV 42 (ASTM A516-60)로 화학조성은 Table 1 과 같고, 압연방향에 대해서 자기이력곡선(VSM)을 측정 한 결과는 Fig. 1에 보인 바와 같이 Ms 223.8412 emu, Hc 4.3750 Oe, Mr 0.2038 emu/g, Hc-Slop 0.0444 emu/g Oe 였다. 시험편의 공칭두께는 6mm로 Fig. 2의 형상으로 두께대비 20%, 40%, 60% 및 80%의 인공결함이 가공되어 있다.

본 연구는 요크형 자속발생부, 누설자속 측정 센서부, 탐상 구동본체, 제어부를 독립적인 방법으로 설계, 제작하여 각각의 실용성을 검증하고, 누설자속탐상 시스템을 개발하는 방법으로 연구목표에 접근하였다. 최종적으로 완성된 시스템은 결함탐상 성능시험을 통해 개발된 시스템의 총합성능을 평가하였다.

Table 1 Chemical composition of SGV 42

Elements	C	Si	Mn	P	S
wt. %	≤0.21	≤0.15-0.30	0.85-1.20	≤0.035	≤0.040

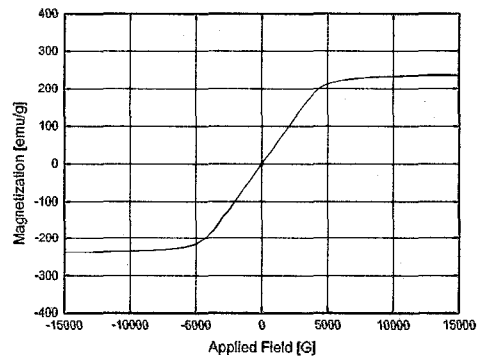


Fig. 1 Hysteresis loop of SGV 42

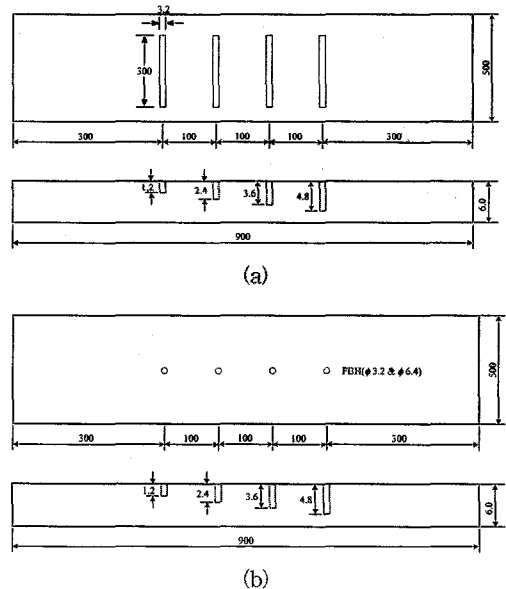


Fig. 2 Shape and dimension of specimen

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 자속발생부

자속발생부는 누설자속탐상 시스템을 구성하는 가장 중요한 부분 중 하나로, 자기적으로 폐회로를 형성할 수 있어야 하고, 결합부에서 누설자속을 발생시킬 수 있는 강력한 자화능력이 필수이다. 또한 자극간 중심에서 가능한 균일한 자속밀도 분포와 사용상 위험요소가 없어야 한다.

따라서 본 연구에서는 제작가능한 영구자석을 조사한 결과 중심 및 모서리에서 대략 800-1000G의 세기를 나타내는 소결 페라이트 자석을 구입하였고, Fig. 3과 같이 별도의 브리지를 형성하여 폐회로를 형성하는 자속발생부를 설계, 개발하였다. 이와같이 브리지를 이용해서 자속발생부를 구성함으로써 향후 자극간 거리의 보정 필요시 브리지만 교체하여 적용시킬 수 있다는 장점과 시험체의 유효결합을 검출하기 위해 보다 높은 자화능이 필요할 때 별도의 구조적 변경없이 영구자석 부분만 교체할 수 있는 장점이 있다.

개발된 자속발생부의 유효크기는 길이 300mm, 폭 180mm, 자극중심간 거리 120mm로 Fig. 4에 나타낸 실험 실적 결과를 바탕으로 제작하였다. Fig. 4의 결과는 Fig. 2 (a)의 시험편을 이용하여 자속발생부의 lift-off를 4mm, 6mm 및 8mm로 변화시켰을 때 15개의 센서로 측정된 누설자속 변화이다. Lift-off 값이 커짐에 따라 누설자속이 상대적으로 낮게 측정되고 있고, 깊이 증가에 따라 단조 증가하는 경향은 매우 이상적인 결과로 자속발생부의 치수설계, 형상 및 자화능이 시스템 적용에 만족할만하다고 판정되었다. Fig. 4 (a), (b)의 80% 깊이 결합의 측정 결과는 센서의 출력범위인 5V의 한계에 다다른 결과이다.

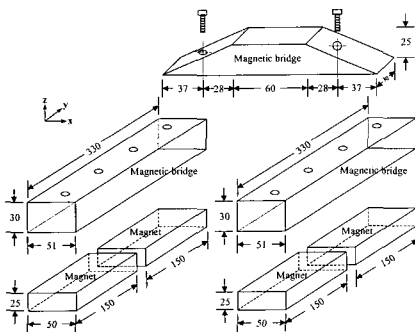
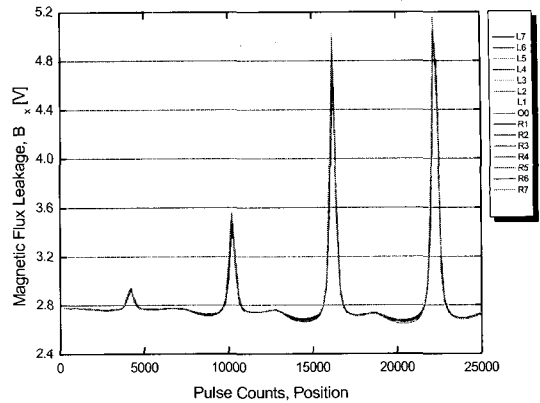
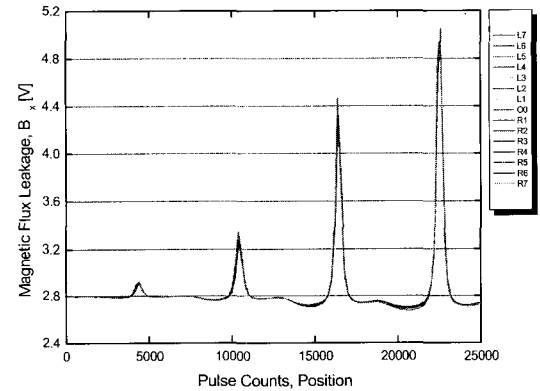


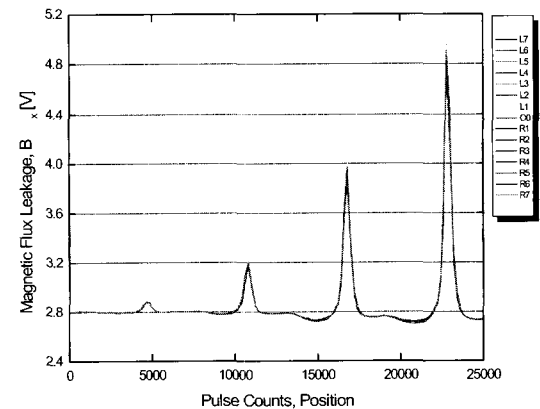
Fig. 3 Developed magnetic yoke



(a) lift-off 4mm



(b) lift-off 6mm



(c) lift-off 8mm

Fig. 4 The MFL measurement for line-type slot

3.2. 어레이센서 개발

어레이센서의 필요성은 경제성에 있다. 시스템이 한번에 탐상하는 범위는 자속발생부의 길이에 해당하고, 따라서 탐상범위내의 결함을 탐지할 센서는 어레이형으로 개발되었다.

센서는 상용되는 미국 Allegro사의 3517 홀센서를 이용하였다. 하우징을 포함한 센서의 실 크기는 가로 4mm, 세로 3mm로 실험적으로 15개를 가로방향으로 간격없이 연속적으로 연결하였고, 각각의 센서를 왼쪽에서 오른쪽으로 L7, L6, ..., O0, ..., R6, R7으로 명명하였다.

Fig. 5는 홀센서 입력전압 5.0V에서 센서 O0가 Fig. 2 (b)의  $\phi 3.2\text{mm}$  슬롯의 중심을 통과할 때 검출된 누설자속을 도시한 것이다. 즉 센서 O0를 중심으로 각각 양쪽 2개의 센서에서 기저전압과 구별되는 누설자속이 검출되었다. 이러한 결과는  $\phi 3.2\text{mm}$  슬롯에 상당하는 결함을 검출하고자 하는 누설자속탐상에서 센서의 간격이 10~16mm를 유지한다고 하더라도 충분히 만족할만한 탐상결과를 얻을 수 있음을 보여주는 결과이다. Fig. 6은 어레이센서의 시제품을 보여주고 있다.

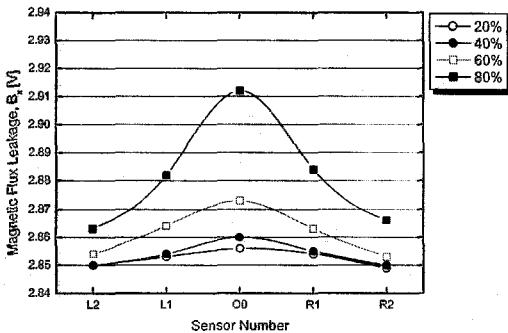


Fig. 5 The peak-peak of detectable MFL signal for  $\phi 3.2\text{mm}$  slot

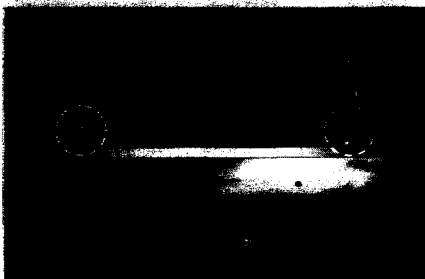


Fig. 6 Fabricated Hall-Effect array sensor

3.3. 탐상 crawler 개발

개발된 crawler의 전체적인 형상은 Fig. 7에 보인 바와 같고, 상술한 어레이센서는 자속발생부 사이에 위치해 있다. 구동부는 시험체와 자석간의 인력을 극복하고 탐상에 적합한 속도로 구동되는 스텝모터를 사용하였다. 정확한 위치제어를 위해서 1000pulse/rev 중공형 엔코더를 사용하였고, 센서가 탐상면을 따라 이동하면서 표면상태에 따라 상,하로 자유롭게 움직이는 유동형 홀더를 사용하여 lift-off의 변화로 인한 측정오차를 최소한으로 하였다. 또한 자속발생부의 lift-off가 증가해도 신호가 줄어들고, lift-off가 실제 결함에서 누설되는 자속밀도보다 더 큰 신호를 나타내는 것이 Fig. 8 (a)의 결과에 나타나 있다. 특히 Fig. 4의 결과를 20%, 40%, 60% 결함의 피크치에 대해 나타낸 (b)의 결과에서 알 수 있듯이 결함이 클 경우 lift-off의 영향은 더욱 현저하다.

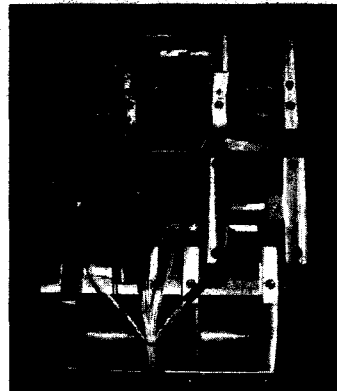
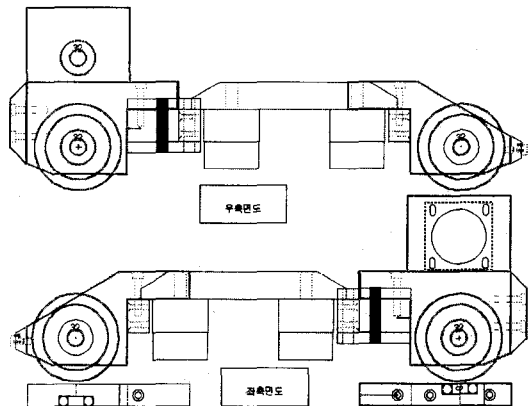
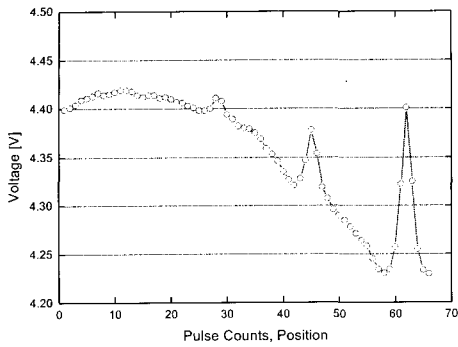
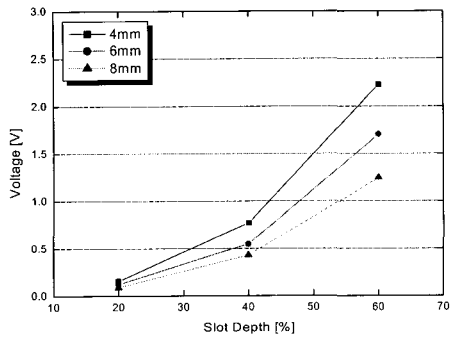


Fig. 7 A developed crawler and design



(a) sensor



(b) magnetic yoke

Fig. 8 The signal difference by lift-off effect

### 3.4. 운용 프로그램 개발

시스템의 성능향상에 운용 프로그램이 미치는 영향은 매우 크다. 먼저 데이터의 처리속도, 실용적 사용환경 기능 등의 향상이 고려되었다.

Fig. 9는 개발된 운용 프로그램의 초기화면이다. 프로그램은 데이터 취득부분과 위치제어 부분으로 구성하였고, 각 센서로부터 취득한 10개의 데이터를 평균하여 3차원 그래픽 및 2차원 그래프로 실시간 출력하도록 하였다. 데이터 출력 직전에는 대비시험편에서 측정된 기저 전압값을 각 채널에 보상하는 루프를 구동시켜 센서 위치에 따른 자속밀도 차이를 보상하였다. Fig. 10은 각 센서의 위치별 자속밀도 차이를 보상하기 위한 루프를 구동시키기 전, 후의 측정결과를 보여주고 있는 것으로 (a)의 결과에서 알 수 있듯이 자속밀도 차이의 보상이 수행되지 않으면 결함부에서 발생한 누설자속을 정확하게 검출할 수 없음을 알 수 있다.

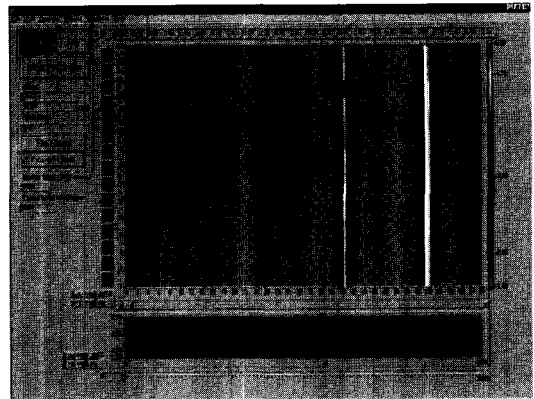
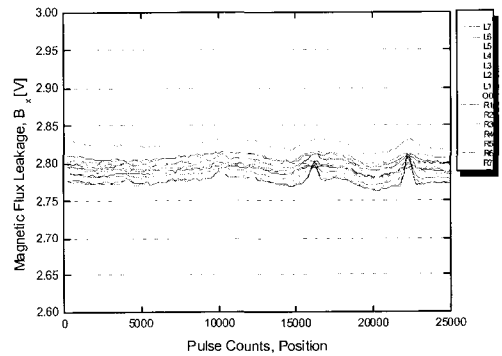
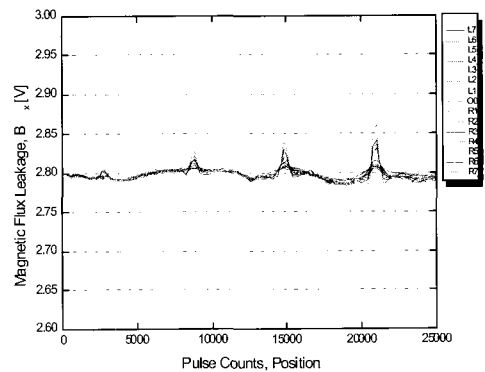


Fig. 9 Print screen of software for MFL measurement



(a)



(b)

Fig. 10 The results of signal processing before and after data compensation

### 3.5. 개발 시스템의 성능

시스템의 성능시험은 자속발생부와 어레이센서를 crawler에 결합시키고, 운용 프로그램으로 전 시스템을 제어, 데이터를 취득하는 종합시험이다. Fig. 2의 시험편을 이용하여 수행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11 (a)~(c)는 바닥면 후면에 발생된 결함의 측정용 모의 실험한 것이고, (d)~(f)는 바닥면 전면에 발생된 결함측정용 모의실험한 결과이다. 측정결과에 나타낸 바와 같이 두께 6mm 강판의 20%, 40%, 60% 및 80% 인공결함이 중심을 지나는 센서 및 주위 센서에서 정확하게 검출되고 있음을 알 수 있다.

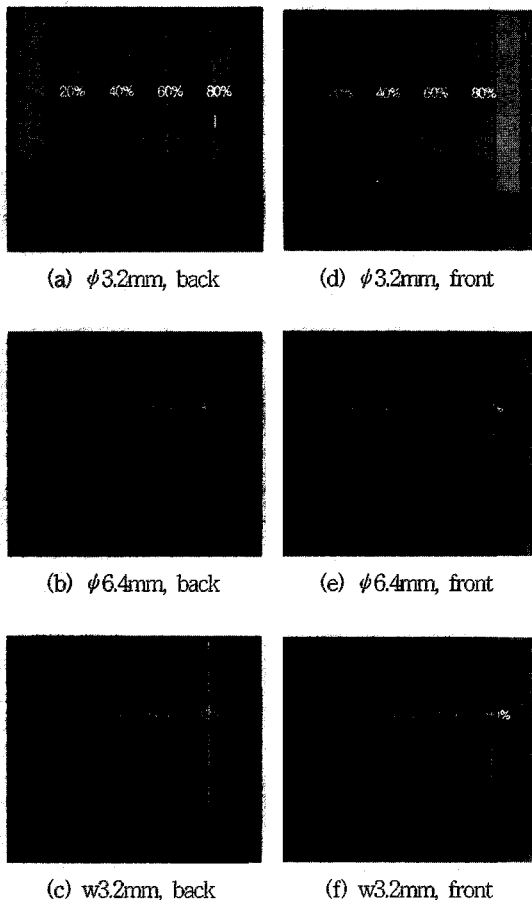


Fig. 11 The results of MFL measurement using developed system

### 4. 결 론

본 연구는 누설자속법을 이용하여 지상 및 지하 저장 탱크의 바닥판에 발생된 부식을 비파괴적으로 검사, 평가하기 위한 시스템 개발에 관한 연구이다. 시스템 개발에 필요한 요소기술 개발이 수행되었고, 시스템 설계 및 제작에 관한 전 부분의 개발이 완료되었다. 세부적인 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 균일한 자속발생을 위해서 소결 영구자석이 매우 효과적이고, 6mm 강판의 검사에 요구되는 자속을 발생시킬 수 있는 폐회로형 자속발생부를 고안, 개발하였다.
- (2) 실용적 목적으로 개발된 어레이센서에는 상용되는 홀센서를 사용하였고, 센서간 간격은 10mm로 결정하였다.
- (3) 시스템을 이송하는 crawler는 센서의 lift-off를 표면 상태에 따라 일정하게 유지할 수 있는 구조로 설계되었다. 스텝모터로 구동되고, 위치제어를 위해서 증폭형 엔코더를 사용하였다.
- (4) 사용자 환경의 운용 소프트웨어는 결과에 대한 3차원 그래픽 표시(display)와 2차원 신호를 실시간으로 출력하여 보다 정확한 평가가 가능하다.
- (5) 개발된 시스템은 산업용 컴퓨터를 기반으로 구성되었고, 성능시험결과 6mm 강판에 가공한  $\phi 3.2\text{mm}$ ,  $d1.2\text{mm}$ 의 슬롯을 강판의 후면에서도 효과적으로 검출할 정도로 성능이 우수하였다. 따라서 개발된 시스템을 직접 현장에 활용할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 「인위재해 방재기술 개발 사업」의 일환으로 수행된 과제입니다.

### 참고문헌

- [1] API Standard 653 : Tank Inspection, Repair, Alternation, and Reconstruction, 2nd ed, American Petroleum Institute, Dec. (1995)
- [2] API Recommended Practice 575 : Inspection of Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks, 1st ed, American Petroleum Institute, Nov. (1995)
- [3] Mk2 Floorscanner Manual, AEA Technology plc., (1997)

- 
- [4] C. Edwards and S. B. Palmer, The Magnetic Leakage Field of Surface-Breaking Cracks, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.19, pp. 657-673 (1986)
- [5] M. J. Bergander, Magnetic Flux Leakage Examination of Petro/Chemical Heat Exchanger Tubing, ASNT's ICPIIT III Topical Conference, pp. 95-102, June (1993)
- [6] J. B. Nestleroth, T. A. Bubenik and G. L. Ridderbusch, A Review of Magnetic Flux Leakage Technology for the In-Line Inspection of Gas Transmission Lines, *Proceeding International Conference on Pipeline Inspection*, paper IV-5, June (1991)
- [7] D. E. Bray and D. McBride, *Nondestructive Testing Technique*, pp. 421-447, John Wiley & Sons Inc., (1992)
- [8] Z. You and D. Bauer, A New Technique for Inspection Top and Bottom Sides of Tank Floors, ASNT's ICPIIT IV Topical Conference, pp. 227-231, June (1995)
- [9] D. M. Amos, The Truth about Magnetic Flux Leakage as Applied to Tank Floor Inspections, ASNT's ICPIIT IV Topical Conference, pp. 232-236, June (1995)
- [10] B. W. Maxfield, P. C. Fitzgerald, A Quantitative Magnetic Flux Leakage Instrument and Its Application to Tank Bottom Corrosion Assessment, ASNT's ICPIIT IV Topical Conference, pp. 237-241, June (1995)
- [11] Z. S. Lim and G. H. Kim, Development of an Automatic Inspection System for Minute Defects in Steel Strip, *FENDT '97*, pp. 305-311, Oct. (1997)